DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.01.017
文章编号：1000-128X(2023)01-0131-07

动车组避雷器受潮故障特征量的变化特性研究

刘　健[1]，林大杰[1]，郭英强[1]，张士宇[1]，王文军[1]，王胜辉[2]
（1.中车长春轨道客车股份有限公司，吉林 长春　130062；
2.华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室，北京　102206）

摘　要：为研究动车组避雷器在受潮情况下的故障特征量变化，搭建了避雷器人工受潮试验平台，控制避雷器分别达到轻度受潮、中度受潮和重度受潮3种状态。试验研究了不同受潮情况下避雷器的直流伏安特性、直流参考电压、0.75倍直流参考电压下的泄漏电流、交流电压下的泄漏电流等特征；同时设计水煮试验开展了相关测试，并与人工受潮试验结果进行了对比和验证分析。人工受潮试验结果表明，避雷器在受潮后的伏安特性曲线发生了明显的变化，泄漏电流由阀片本体的泄漏电流和筒壁泄漏电流组成，并且随着电压升高，环氧筒筒壁电流将占主导分量；避雷器直流参考电压U_{1mA}在重度受潮时下降了6.8%，已经低于规程要求的5.0%；其0.75倍U_{1mA}下的泄漏电流在轻度受潮时较正常状态增加了6倍，结合水煮试验可知，在受潮避雷器恢复干燥后，0.75倍U_{1mA}下的泄漏电流也恢复到了正常值，即该故障特征量仅在避雷器受潮时反映灵敏；避雷器阻性电流在正常情况下占全电流的10%~20%，受潮后阻性电流占比达到了正常状态下的4倍，即阻性电流对受潮故障反映更加灵敏。

关键词：动车组；避雷器；受潮；伏安特性；水煮试验
中图分类号：U266.2　　**文献标识码：**A

Study on variations in moisture-affected fault characteristics of EMU lightning arrester

LIU Jian[1], LIN Dajie[1], GUO Yingqiang[1], ZHANG Shiyu[1], WANG Wenjun[1], WANG Shenghui[2]

(1. CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun, Jilin 130062, China; 2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102200, China)

Abstract: In order to study the changes in the fault characteristics of the EMU lightning arresters exposed to moisture, an artificial moisture test platform of lightning arresters was built, on which the lightning arrester can be controlled to reach three states of light, mild and severe moisture respectively. The test was performed to study the characteristics of lightning arresters under different moisture conditions, including DC volt-ampere characteristics, DC reference voltage, leakage current under 0.75 times DC reference voltage and leakage current under AC voltage. Moreover, the water boiling test was carried out under the design conditions, and the results were compared with the artificial moisture test results for verification. According to the artificial moisture test results, the lightning arrester after moisture experienced significant changes in the volt-ampere characteristics curve; the leakage current contributed by the valve disc body and the cylinder wall was dominated by the epoxy cylinder with the increase in voltage; the DC reference voltage (U_{1mA}) decreased by 6.8% in severe moisture, lower than the specification requirements of 5.0%; the leakage current at 0.75 times U_{1mA} increased by 6 times in light moisture than that in the normal state. According to the water boiling test results, for the lightning arrester dried from the moisture

通信作者：王胜辉（1977—），男，副教授，硕士生导师，主要从事电气设备在线监测与故障诊断方面的研究；E-mail：hdwsh@ncepu.edu.cn
引用格式：刘健, 林大杰, 郭英强, 等. 动车组避雷器受潮故障特征量的变化特性研究[J]. 机车电传动,2023(1):131-137.
Citation：LIU Jian, LIN Dajie, GUO Yingqiang, et al. Study on variations in moisture-affected fault characteristics of EMU lightning arrester[J]. Electric Drive for Locomotives,2023(01):131-137.

state, the leakage current at 0.75 times U_{1mA} also returned to the normal values, that is, the fault characteristic is only sensitive when the lightning arrester is in the moisture state; the resistive current accounted for 10%-20% of the total current in the normal conditions, and this proportion rose 4 times in the moisture state, that is, the resistive current is more sensitive to the moisture-affected fault.

Keywords: EMU; lightning arrester; moisture; volt-ampere characteristic; boiling test

0 引言

近年来，我国动车组车顶氧化锌避雷器出现了多起异常发热现象，甚至发生炸裂事故[1-3]。经统计，避雷器因内部缺陷而导致故障的占比约为3%，受潮是内部缺陷的主要类型，其后果最为严重，严重影响内部绝缘，可导致避雷器炸裂[4-6]。

针对避雷器的受潮问题，文献[7]研究了电气参数对避雷器受潮缺陷的灵敏度，并提出采用光纤测温法检测避雷器的受潮位置；文献[8]研究了避雷器受潮时的温度分布情况，仿真表明避雷器在正常情况和受潮情况下的温升分布明显不同，并提出可通过温升变化判断受潮位置；文献[9]研究了避雷器在不同位置受潮时的电气参数变化情况，指出阻性电流峰值是判断受潮位置的重要参数；文献[10]基于解体检查和能谱测试，发现避雷器阀片受潮可导致阀片性能发生劣化；文献[11]分析了避雷器内部受潮的原因，并指出受潮时其泄漏电流增大且发热效应更加明显，阀片将会加速劣化，最终可能导致避雷器热崩溃；文献[12]指出通过解体检查能够更好地发现避雷器的受潮缺陷，通过实时监测阻性电流，不仅可以发现避雷器是否受潮，而且可以检测到避雷器的绝缘情况；文献[13]研究了氧化锌避雷器在不同运行状况和不同部位受潮时场强变化情况，提出了采用光纤–场强法来判断避雷器内部的受潮缺陷的方法。目前我国规程[14]规定避雷器的劣化判据为直流参考电压 U_{1mA} 小于 58.0 kV，但在工程实际中，多起避雷器故障的检测参数虽满足该要求，但其相关参数已出现了部分异常的现象，解体检查发现其内部已经发生了受潮，而目前动车组避雷器的检修间隔周期较长，给避雷器的安全稳定运行造成极大的隐患。

基于上述分析可知，目前对于受潮故障的研究多集中于已经发生故障的避雷器[15-17]，而对于车顶避雷器在不同受潮程度，尤其是早期受潮阶段的故障特征量的变化还缺乏系统研究。基于此，本文首先搭建了避雷器受潮模拟试验平台，模拟了避雷器由正常状态到重度受潮的过程，并对不同受潮情况下的故障特征量进行对比分析，然后对整支避雷器进行了长期水煮试验并测试了相关故障特征量的变化特性。在工程实际中，根据故障特征量在不同受潮程度下灵敏度的差异，可为动车组避雷器在受潮状态评估时的参数选择提供试验依据。

1 人工受潮试验方法

1.1 人工受潮试验平台

整体完好的避雷器内部受潮过程极慢，且内部受潮程度很难控制，为了使得避雷器快速受潮并且实现内部受潮尽量均匀，本文采用定制的避雷器搭建了人工受潮试验平台，如图1所示。

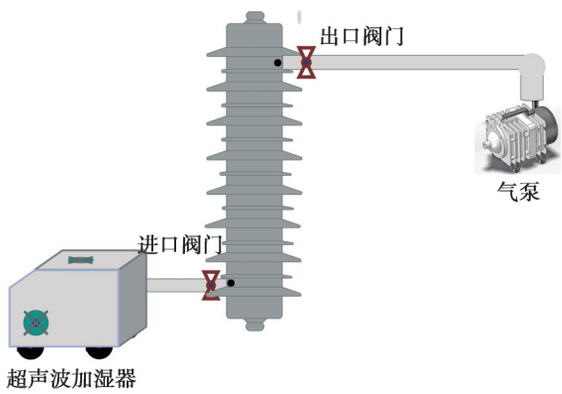


图1 避雷器受潮模拟试验图

Fig. 1 Schematic diagram of simulation test for lightning arrester exposed to moisture

该避雷器型号为YH10WT-42/105，直流参考电压 U_{1mA} 为60.5 kV，0.75倍 U_{1mA} 下的泄漏电流为7 μA。在低压端金属法兰上方10 cm处开有进气孔，在高压端金属法兰下方10 cm处开有抽气孔，孔的直径均为2 cm。用超声波加湿器在进气孔注入水蒸气，同时在抽气孔使用抽气泵将潮湿气体抽出避雷器。潮湿气体在避雷器内部由低压端向高压端流动，可以实现对避雷器内部充分且均匀加湿。

本文根据超声波加湿器的加湿量以及相关实践经验，将对应的人工受潮时间分别定为5 min、15 min和30 min，模拟避雷器轻度受潮、中度受潮和重度受潮3种情况。

1.2 直流电气性能测试

直流电气性能测试平台如图2所示，选用东文高压电源公司的DW-P104-2ACF2型直流高压电源，输出电压范围0~100 kV，时漂精度0.1%/h，温漂精度0.1/℃。直流试验时，分别对避雷器逐步增加直流电压，记录不同电压下的泄漏电流，直至电流达到1 mA，记录此时的直流参考电压，然后将电压降低至0.75倍的直流参考电压，并记录泄漏电流。

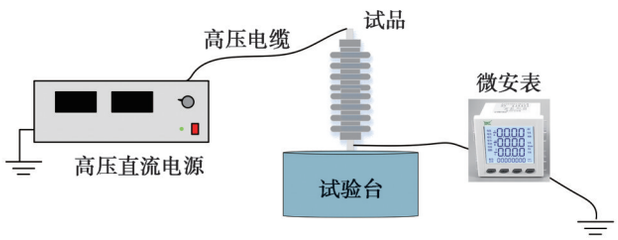


图2　直流电气性能测试平台

Fig. 2　DC electrical performance test platform

1.3　交流电气性能测试

交流试验能够较好地模拟避雷器的实际运行工况，可分析全电流和阻性电流的变化特性，图3为避雷器交流电气性能测试平台。

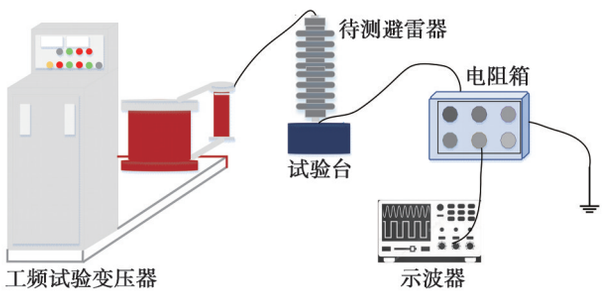


图3　交流电气性能测试平台

Fig. 3　AC electrical performance test platform

工频高压电源由调压器和升压变压器组成，为降低测量误差，采用无局放变压器，并对高压连接线端部采取屏蔽措施，以避免局部放电可能产生的干扰。在接地线串联了10 kΩ精密电阻采集电流信号。将分压器输出的电压信号和精密电阻采集的电流信号接入示波器，记录电压、电流波形。

2　试验结果及分析

2.1　直流电气性能测试结果及分析

为对比受潮前后避雷器的绝缘性能变化，在进行人工受潮试验前，首先测试了正常状态下的避雷器绝缘电阻和直流电气特性。测试结果表明绝缘电阻大于22 GΩ。模拟3种不同程度的受潮情况后，避雷器绝缘电阻测试结果如表1所示。

表1　不同受潮情况下的绝缘电阻

Table 1　Insulation resistance under different moisture conditions

表面状态	正常	轻度受潮	中度受潮	重度受潮
绝缘电阻/ GΩ	>22	12	0.33	0.07

在轻度受潮情况下，避雷器绝缘电阻显著下降，但仍然高于规程要求的1 GΩ的规程值，在中度和重度受潮情况下，绝缘电阻已经下降到较低水平。

直流电压下的伏安特性测试结果如图4所示。正常状态下，避雷器伏安特性曲线具有良好的非线性特性，但当避雷器受潮后，其泄漏电流明显增加，同时曲线的形状也发生了较为明显的改变。

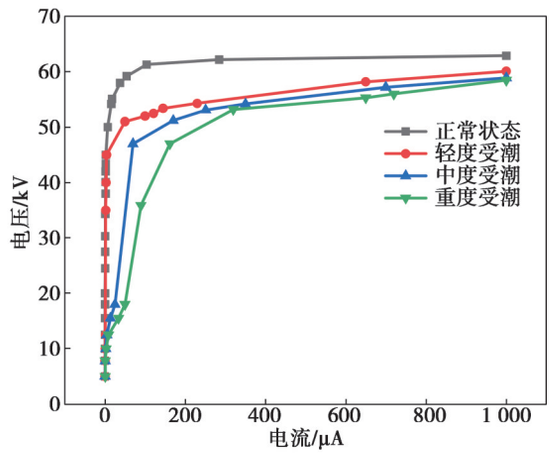


图4　不同受潮程度下的伏安特性曲线

Fig. 4　Volt-ampere characteristic curves under different moisture levels

由图4可知，正常状态下，当施加直流电压达到30 kV时，泄漏电流大约为1 μA。当施加的直流电压超过50 kV后，泄漏电流开始随电压升高而明显增加，具有良好的非线性特性。当避雷器人工受潮后，其泄漏电流将由两部分所构成：阀片本体的泄漏电流和筒壁泄漏电流。电压较低时，环氧筒表面的泄漏电流占主导分量，施加电压为10 kV时，泄漏电流即可达到1 μA，随后随着电压增加，其泄漏电流也明显增加，环氧筒表面的泄漏电流占主导分量，因而泄漏电流呈现出一定的线性增加趋势。当电压超过50 kV后，阀片本体的泄漏电流将占主导分量，随着电压增加，其泄漏电流急剧增加，表现出明显的非线性特性。

基于试验数据，可得到避雷器直流参考电压U_{1mA}与受潮程度的关系，如图5所示。

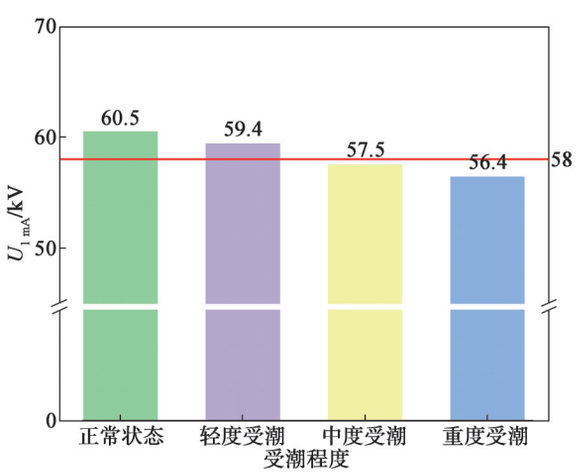


图5　不同受潮程度下的U_{1mA}

Fig. 5　U_{1mA} under different moisture levels

由图5可知，正常状态下避雷器的U_{1mA}值为60.5 kV。随着受潮严重程度的增加，其U_{1mA}呈下降趋势，轻度、中度和重度受潮情况下的直流参考电压分别为59.4 kV、57.5 kV和56.4 kV。与正常状态下的直流参

考电压相比，轻度、中度和重度受潮情况下直流参考电压下降百分比分别为1.8%、5.0%和6.8%。虽然轻度受潮下的U_{1mA}绝对值满足规程“大于58.0 kV”的要求，但若不及时采取措施，随着内部受潮区域扩大，将给避雷器长期稳定运行造成严重隐患。在工程实际中进行判断时，还需要与避雷器的出厂参数值以及历史测试值下降的相对值进行比较，仅依据绝对值判断容易造成误判。

同理可以得到0.75倍直流参考电压下的泄漏电流变化趋势如图6所示。正常避雷器，其0.75倍U_{1mA}下的泄漏电流约7 μA。受潮后，泄漏电流显著增加，即使在轻度受潮情况下，避雷器泄漏电流也达到了48 μA，约为正常状态下泄漏电流的7倍。随着受潮严重程度的增加，泄漏电流呈现出明显的增加趋势。因此，0.75倍U_{1mA}下的泄漏电流可作为避雷器是否受潮的重要判据。

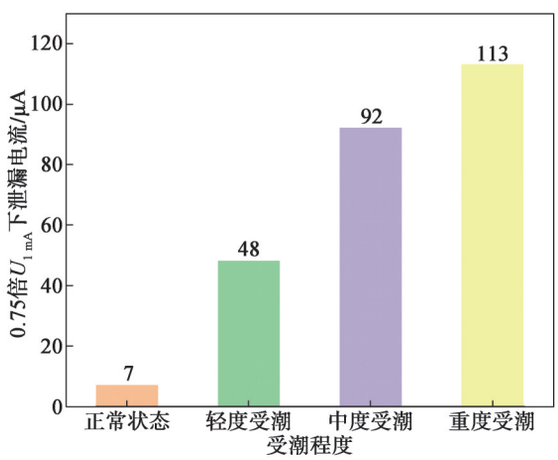


图6 不同受潮程度下0.75倍U_{1mA}下的泄漏电流

Fig. 6 Leakage current at 0.75 times U_{1mA} at different moisture levels

2.2 交流电气性能测试结果及分析

根据采集到的电压、电流波形，利用MATLAB编写程序分析不同受潮程度下避雷器在交流电压作用下的电流波形特征。同时对采集的电压、电流波形分别进行傅里叶变换，进一步计算得到了避雷器在持续运行电压下的全电流、阻性电流和3次谐波电流含量。

表2为不同受潮程度下避雷器在不同电压（有效值）下的泄漏电流（全电流有效值）值。

表2 不同受潮程度下在不同电压下的全电流变化

Table 2 Tolal current variation at varying voltages under different moisture levels

正常状态		轻度受潮		中度受潮		重度受潮	
电压/kV	电流/mA	电压/kV	电流/mA	电压/kV	电流/mA	电压/kV	电流/mA
4.96	0.07	4.98	0.08	5.04	0.09	5.04	0.14
10.00	0.14	9.73	0.14	10.00	0.21	9.94	0.27
14.80	0.20	15.01	0.22	15.10	0.30	15.00	0.39
20.00	0.21	20.05	0.28	20.01	0.31	19.80	0.50
27.50	0.37	23.37	0.37	27.60	0.48	27.50	0.69
30.00	0.40	30.00	0.41	30.00	0.50	30.00	0.71
33.90	0.45	34.20	0.46	34.00	0.65	33.80	0.78
41.90	0.56	41.86	0.58	41.90	0.80	42.00	1.14

由表2可知，随着受潮程度的增加，在承受同一电压情况下，避雷器全电流有增大的趋势；但在轻度受潮情况下，泄漏电流与正常状态相比变化不明显，在重度受潮情况下，全电流增加较为明显。

42 kV下正常状态和重度受潮时避雷器的电流波形如图7所示。

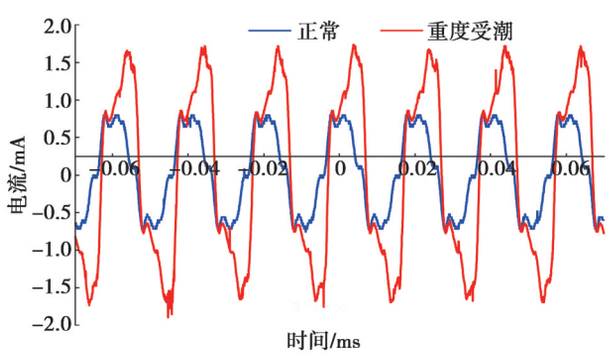
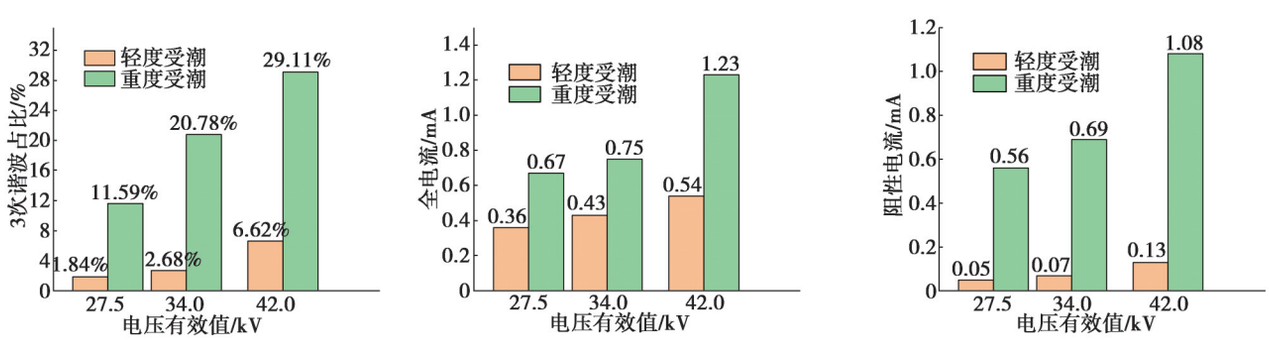


图7 42 kV下正常状态和重度受潮时避雷器电流波形

Fig. 7 Current waveform of lightning arrester under normal state and severe moisture at 42 kV

由图7可知，在重度受潮下避雷器的电流波形发生了明显的畸变，分析了两种状态下避雷器的3次谐波含量、全电流和阻性电流值的变化，如图8所示。

由图8可知，在重度受潮情况下，其3次谐波含



(a) 3次谐波占比变化 (b) 全电流变化 (c) 阻性电流变化

图8 轻度和重度受潮时避雷器交流电气量变化

Fig. 8 Change of AC electrical performance of lightning arrester under mild and severe moisture

量、全电流和阻性电流均有较明显增加，以额定工作电压27.5 kV为例，避雷器泄漏电流中的3次谐波占比相比正常状态增加了9.75百分点、全电流增加了0.31 mA，阻性电流比正常状态下增加了0.51 mA。避雷器在正常状态时，阻性电流占全电流的10%~20%[18-20]，根据图8数据可知，重度受潮情况时，在27.5 kV、34.0 kV和42.0 kV电压下，阻性电流在全电流的占比分别达到了83.6%、92.0%和87.0%，约为正常情况时的4倍，因此阻性电流占比对受潮故障的灵敏度较高。

3　避雷器长期水煮试验

3.1　水煮试验方法

鉴于该型号避雷器在现场例行检修中出现了多起检测不合格，为进一步模拟其在实际运行中潮气渗入的可能性，并验证上述人工受潮模拟试验结果，本文重新选取了一支同型号的避雷器，根据GB/T-11032—2020标准相关规定，开展了长期水煮试验。

水煮设备容器装置直径为60 cm，高度为80 cm，底部有大功率加热装置，可将水加热至沸腾。该避雷器试验前测量直流参考电压U_{1mA}为60.73 kV。

将避雷器置于上述容器后，添加去离子水淹没整个避雷器。加热至水沸腾，然后每隔100 h，取出试品置于室温下，待冷却到环境温度后，进行U_{1mA}、0.75倍U_{1mA}下的泄漏电流、全电流以及阻性电流测量。

试验600 h后，停止水煮，将避雷器置于纯净水环境中。同时为方便水汽侵入，将泄放口结构破坏，模拟避雷器内部严重受潮的情况。每浸泡24 h后取出避雷器放入干燥箱中，将水分完全烘干并冷却至室温后进行相关测试，测试方法与人工受潮试验中所用测试方法相同。

3.2　直流电压下电气性能测试结果及分析

水煮试验过程中，其避雷器直流参考电压U_{1mA}的变化曲线如图9所示。

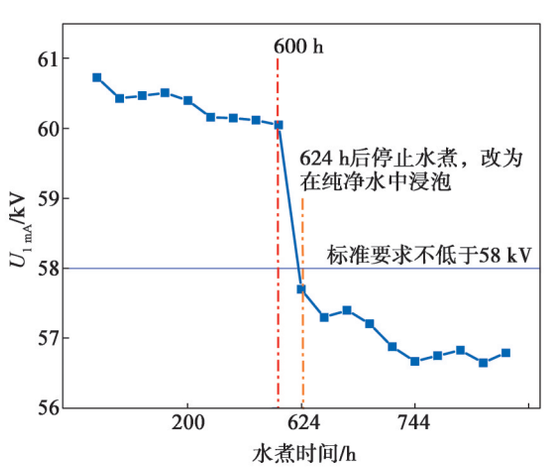


图9　避雷器直流参考电压U_{1mA}变化曲线

Fig. 9　U_{1mA} change curve of lightning arrester

由图9可知，在前600 h水煮试验过程中，避雷器U_{1mA}整体呈下降趋势，但下降幅度较小，600 h后U_{1mA}降为60.19 kV，与初始60.73 kV相比仅下降了0.9%，但U_{1mA}仍大于标准要求的58 kV。由于上述曲线存在持续下降，结合人工模拟试验分析，其内部应该存在轻度受潮缺陷，这表明U_{1mA}在轻度受潮下对氧化锌避雷器的受潮状态的反映不够灵敏，与人工模拟试验的结果一致。

在624 h后的性能测试中，其U_{1mA}的变化曲线如图10后半部分所示，分析可知，该值在624 h时即下降为57.8 kV，已经低于标准要求的58 kV，说明水分渗入后会对阀片本体和环氧筒造成不可逆的影响。随后在624~744 h之间，该值仍然整体呈进一步下降趋势，744 h时的U_{1mA}值为56.67 kV，744 h后U_{1mA}在56.5 kV附近波动，U_{1mA}未进一步下降。

由以上分析可知，直流参考电压U_{1mA}对避雷器轻微受潮反映不灵敏，在避雷器严重受潮时有较大的变化。严重受潮的避雷器即使在干燥后，U_{1mA}依然可以反映出避雷器经受过严重受潮。

文中还同时开展了0.75倍U_{1mA}下的泄漏电流测试。其泄漏电流变化曲线如图10所示。

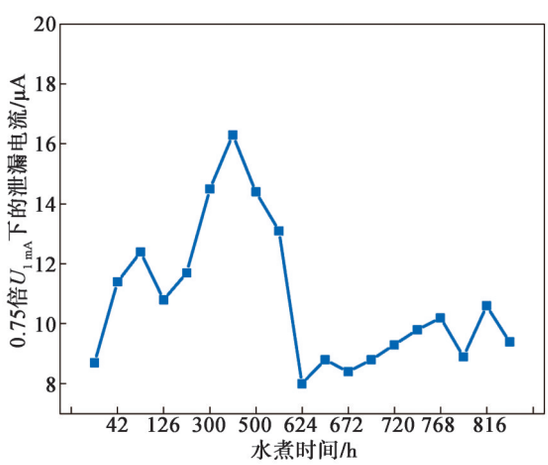


图10　0.75倍U_{1mA}下的泄漏电流

Fig. 10　Leakage current at 0.75 times U_{1mA}

由图10可知，在600 h的避雷器水煮试验过程中，前600 h避雷器0.75倍U_{1mA}下的泄漏电流整体呈上升趋势，由试验前8.5 μA上升为16.9 μA，电流增加了约1倍，但仍小于标准要求的50 μA。这说明在上述水煮试验中，已经有微量水分渗入，相比U_{1mA}，泄漏电流对避雷器轻度受潮的反映更为灵敏。

在624 h后的0.75倍U_{1mA}下泄漏电流测试中，泄漏电流在8~10 μA附近波动。这说明即使避雷器在运行过程中曾经受潮，但经过一段时间干燥后，0.75倍U_{1mA}下的泄漏电流与新避雷器相差不大。

由以上分析可知，0.75倍U_{1mA}下的泄漏电流对避雷器正处于受潮状态时的反映更为灵敏。当避雷器受潮干燥后，0.75倍U_{1mA}下的泄漏电流不适合作为氧化锌避雷

器是否受潮的监测参量，此时U_{1mA}反映则更为有效。

3.3 交流电压下电气性能测试结果及分析

在前600 h水煮试验中，每隔100 h开展一次避雷器的全电流及阻性电流测试，其在27.5 kV、34.0 kV及42.0 kV 3种电压下全电流有效值变化曲线如图11所示。

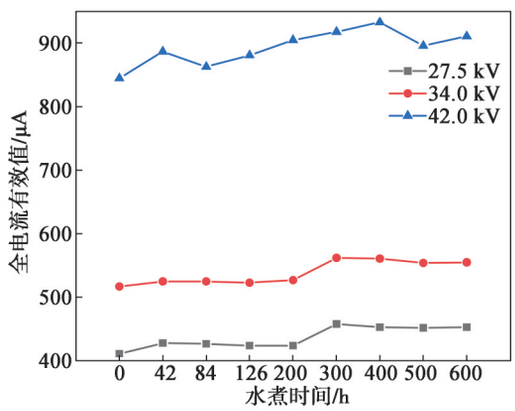


图11 避雷器全电流有效值

Fig. 11 Total current effective value of lightning arrester

由图11可知，在600 h的水煮试验过程中，避雷器全电流有效值整体呈现上升趋势。其原因可能是在水煮试验中，有微量水分渗入。

在上述3种电压下的避雷器阻性电流基波峰值变化曲线如图12所示。

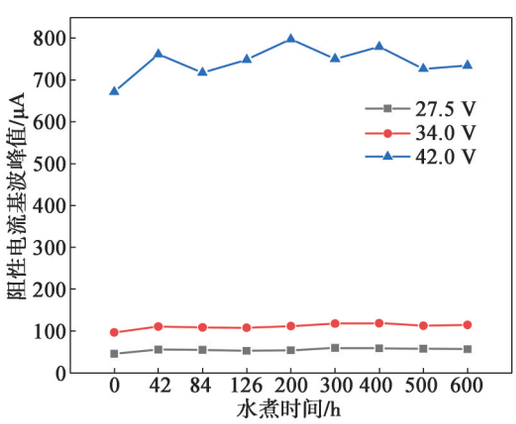


图12 避雷器阻性电流基波峰值

Fig. 12 Peak value of resistive current fundamental wave of lightning of arrester

由图12可知，600 h的水煮试验过程中，避雷器在27.5 kV及34.0 kV下阻性电流变化不是很明显，而在42.0 kV下阻性电流与开始相比有一定上升的趋势，但变化不大，说明其内部受潮属于轻微受潮。

综上分析，在长期水煮试验中，直流参考电压U_{1mA}有下降的趋势，0.75倍U_{1mA}下的泄漏电流有上升的趋势，全电流、阻性电流呈上升趋势，与人工受潮试验中避雷器电气特征量变化相吻合。

4 结论

本文搭建了人工受潮试验平台，研究了避雷器在不同受潮状态下的直流和交流电气性能的变化特性，同时结合水煮试验，分析了避雷器的故障特征量对受潮的灵敏度，研究成果可为机车避雷器受潮状态评估时参数的选择提供试验依据，基于本文相关研究，结论如下：

① 与正常状态下的U_{1mA}相比，轻度、中度和重度受潮情况下的U_{1mA}下降百分比分别为1.8%、5.0%和6.8%，结合长期水煮试验可得，U_{1mA}在轻度受潮时下降得并不明显，在重度受潮状态下变化明显且不可逆，在避雷器恢复干燥时，其依然能够很好地反映出避雷器的故障状态。

② 在人工受潮模拟试验中，泄漏电流呈上升趋势，轻度受潮时泄漏电流较正常状态增加了6倍，结合长期水煮试验发现0.75倍U_{1mA}下的泄漏电流对避雷器正处于受潮状态时的反映更为灵敏。

③ 随着受潮程度的增加，在承受同一电压情况下，避雷器全电流有增大的趋势。避雷器在不同受潮程度下，阻性电流占全电流的83.6%~92.0%，而正常状态下阻性电流占比只有10%~20%，因此对于受潮故障，阻性电流的反映更加灵敏。

④ 目前本文的相关研究主要偏重于试验方法，后续可通过测试避雷器各部件受潮后的性能，建立受潮避雷器有限元仿真模型，进一步从理论上分析相关参数的变化特性。

参考文献：

[1] 律方成, 张启哲, 王胜辉, 等. 动车组车顶避雷器温度分布测量及缺陷仿真研究[J]. 电网技术, 2022, 46(3): 1223-1231.
LYU Fangcheng, ZHANG Qizhe, WANG Shenghui, et al. Temperature distribution measurement and defect simulation of roof arrester of EMU[J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 1223-1231.

[2] 杨斯渤, 郭晨曦, 董文哲, 等. 动车组高压设备状态检修试验策略研究[J]. 铁道车辆, 2021, 59(6): 85-89.
YANG Sile, GUO Chenxi, DONG Wenzhe, et al. Research on test strategy of condition inspection and repair of high-voltage equipment of EMUs[J]. Rolling Stock, 2021, 59(6): 85-89.

[3] 任佳艺, 孙继星, 李天册. 动车组避雷器高频耐受特性研究[J]. 电气化铁道, 2020, 31(增刊2): 42-46.
REN Jiayi, SUN Jixing, LI Tiance. Study on high frequency tolerance characteristics of EMU arrester[J]. Electric Railway, 2020, 31(Suppl 2): 42-46.

[4] 刘隰蒲, 王俊娜, 温泉, 等. 220 kV金属氧化物避雷器故障类型分析与处理[J]. 电工技术, 2021(7): 131-133.
LIU Xipu, WANG Junna, WEN Quan, et al. Fault type analysis and treatment of 220 kV metal oxide arrester[J]. Electric Engineering, 2021(7): 131-133.

[5] 史志强, 段涛, 李占峰, 等. 特高压氧化锌避雷器受潮缺陷

试验分析[J]. 电瓷避雷器, 2020(6): 117-121.
SHI Zhiqiang, DUAN Tao, LI Zhanfeng, et al. Experimental analysis on dampness defect of UHV zinc oxide arrester[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(6): 117-121.

[6] 曾国, 王晓, 刘守文, 等. 受潮避雷器温升分布特性仿真分析[J]. 湖北电力, 2020, 44(5): 34-41.
ZENG Guo, WANG Xiao, LIU Shouwen, et al. Simulation analysis of temperature rise distribution characteristics of damp arrester[J]. Hubei Electric Power, 2020, 44(5): 34-41.

[7] 史志强, 邓维, 罗日成, 等. 氧化锌避雷器受潮与电气参数的关系[J]. 高压电器, 2019, 55(4): 233-238.
SHI Zhiqiang, DENG Wei, LUO Richeng, et al. Relation between moisture and electrical parameters of zinc oxide arrester[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(4): 233-238.

[8] 律方成, 张启哲, 王胜辉, 等. 动车组车顶避雷器内部缺陷的解体试验研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2022, 49(3): 67-74.
LYU Fangcheng, ZHANG Qizhe, WANG Shenghui, et al. Experimental study on disassembly of EMU roof arrester with internal defects[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2022, 49(3): 67-74.

[9] 仝杨. 氧化锌避雷器常见故障分析及防治对策研究[J]. 电力设备管理, 2020(12): 174-176.
TONG Yang. Analysis of common failures of zinc oxide arresters and research on prevention and treatment measures [J]. Electric Power Equipment Management, 2020(12): 174-176.

[10] 杨迪, 程现铁, 王峰, 等. 110 kV避雷器内部受潮检测分析[J]. 中国科技信息, 2020(24): 42-43.
YANG Di, CHENG Xiantie, WANG Feng, et al. Analysis of moisture detection inside 110 kV lightning arrester[J]. China Science and Technology Information, 2020(24): 42-43.

[11] 邓维, 史志强, 刘卫东, 等. 电位分布法带电检测500 kV氧化锌避雷器内部缺陷的研究[J]. 电瓷避雷器, 2020(1): 23-28.
DENG Wei, SHI Zhiqiang, LIU Weidong, et al. Fault diagnosis of 500 kV MOA based on electric field and potential distribution characteristics[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(1): 23-28.

[12] 高峰, 郭洁, 徐欣, 等. 交流金属氧化物避雷器受潮与阻性电流的关系[J]. 高电压技术, 2009, 35(11): 2629-2633.
GAO Feng, GUO Jie, XU Xin, et al. Relation between resistive current and MOA affected with damp[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(11): 2629-2633.

[13] 陈子宣, 李春茂, 黄科宇, 等. 动车组避雷器可靠性与老化特征参量的相关性[J]. 电瓷避雷器, 2018(2): 111-115.
CHEN Zixuan, LI Chunmao, HUANG Keyu, et al. Relationship between reliability and aging characteristic parameters for surge arrester of EMU[J]. Insulators and Surge Arresters, 2018(2): 111-115.

[14] 全国避雷器标准化技术委员会(SAC/TC81). 交流无间隙金属氧化物避雷器: GB/T 11032—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
National Technical Committee for Standardization of Surge Arrester (SAC/TC81). Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems: GB/T 11032—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.

[15] 谭佳雨. 基于电气及介电特性的金属氧化物避雷器老化受潮状态分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
TAN Jiayu. Moisture and aging level evaluation of MOA based on electrical and dielectric properties[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.

[16] DING Ning, YANG Ming, SU Ning, et al. Classification of arrester defects based on Naive Bayesian inference[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 804: 042006.

[17] 刘尉, 肖集雄, 金硕, 等. 基于场路耦合的500 kV氧化锌避雷器受潮缺陷分析[J]. 电瓷避雷器, 2022(1): 118-125.
LIU Wei, XIAO Jixiong, JIN Shuo, et al. Analysis on damp defect of 500 kV zinc oxide arrester based on field-circuit coupling[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(1): 118-125.

[18] 张文浪, 王桥莉, 张光耀. 氧化锌避雷器故障类型与诊断分析[J]. 科学技术创新, 2021(32): 72-74.
ZHANG Wenlang, WANG Qiaoli, ZHANG Guangyao. Fault type and diagnosis analysis of zinc oxide arrester[J]. Scientific and Technological Innovation, 2021(32): 72-74.

[19] 岳刚. 一起避雷器阻性电流试验分析[J]. 云南电力技术, 2021, 49(3): 39-41.
YUE Gang. A lightning arrester resistance current test analysis[J]. Yunnan Electric Power, 2021, 49(3): 39-41.

[20] 杨明, 兰静涛, 李威, 等. 220 kV金属氧化物避雷器异常原因的分析[J]. 电工技术, 2021(21): 157-160.
YANG Ming, LAN Jingtao, LI Wei, et al. Analysis of abnormal causes of 220 kV metal oxide arrester[J]. Electric Engineering, 2021(21): 157-160.

收稿日期：2022-03-05
修回日期：2022-11-22